

557223

固体火箭系统 工作过程的理论基础

[苏]Б.А.莱兹别格 Б.Т.叶罗欣 К.П.沙姆索诺夫 著

刘光宇 梅其志 译

国防工业出版社

557223

V435
10

HK12/14

固体火箭系统工作过程的 理 论 基 础

Б. А. 莱兹别格
〔苏〕 Б. Т. 叶罗欣 著
К. П. 沙姆索诺夫
刘光宇 梅其志 译



国防工业出版社



C0286851

内 容 简 介

本书主要论述了在固体燃料火箭系统, 诸如发动机、燃气发生器、火箭发射装置内进行的气动力和内弹道过程的物理基础和理论计算方法, 并对工作过程中的主要参数关系式及其应用条件和范围, 以及建立简化的工程计算与估算方法方面作了必要的介绍。

书中对内弹道过程的气动力理论作了一定的发展, 并推导出在燃烧室内均质和两相的燃烧产物的运动方程, 建立了在装药通道中、开缝槽内以及喷管前腔容积内燃气流动的最终关系式。

本书还以相当大的篇幅对进入稳态工作前的点火、推力中止期间的压降和强迫熄火这些不稳定过程的物理现象进行了分析, 并以数学方法进行了描述和特性计算。

另外, 书中还论述了在有侵蚀效应、压头损失、燃速场不均匀等情况下的单根装药及多根装药系统内弹道特性稳定值的计算方法, 讨论了推力、此推力和比冲量以及此冲量在燃烧室和喷管中损失的计算。

本书适用于从事固体火箭发动机和其它有关专业的研究、设计的科技人员参考; 也可供研究生和大专院校师生阅读使用。

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В РАКЕТНЫХ СИСТЕМАХ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Б. А. Райзберг Б. Т. Ерохин

К. П. Самсонов

Издательство «Машиностроение» 1972

*

固体火箭系统工作过程的理论基础

Б. А. 莱兹别格

〔苏〕 Б. Т. 叶罗欣 著

К. П. 沙姆索诺夫

刘光宇 梅其志 译

责任编辑: 崔金泰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张15³/₁₆ 401千字

1984年8月第一版 1984年8月第一次印刷 印数: 0,001-1,320册

统一书号: 15034·2654 定价: 2.25元

译 序

本书是一部专门论述固体火箭发动机系统内弹道的基础理论著作,对发动机内部过程进行了比较全面系统的分析,提出了数学描述的一般理论,处理方法和普遍表达式。在物理模型基础上,对各种理论问题和一系列研究课题,根据气体动力学和热力学的知识,在合理简化假设及给定初始边界条件下进行了数学推导,得出简化的工程计算方法;根据现代研究成果及计算技术的发展,在电子计算机上进行求解已不再是困难的问题。

虽然许多国家以前发表了大量的有关固体火箭发动机理论方面的著作和文章,但是有关燃烧室内部过程的基本理论中的主要问题,还缺乏用现代知识水平做充分、系统和完整的阐述,而本书在一定程度上却正好填补了这方面的空白,它基本上反映了这一领域在七十年代初期关于发动机内弹道基本理论方面的研究和发展水平。

本书的特点就是它的系统性,理论性和完整性较强,因此在系统掌握有关固体火箭发动机内部过程的现代基本理论以及对于从事理论研究,设计和教学无疑都会有所帮助,是一部有价值的参考书。

担任本书翻译的有刘光宇(前言、第一章~第十一章)及梅其志(第十二章~第十七章),并由刘光宇对全文进行了校对。

由于译者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

前 言

现代固体燃料火箭发动机的设计实践,在试验研究、设计人员面前提出一系列工作过程理论方面的课题。其中首先是属于同热工作状态、热保护的冲蚀、侵蚀燃烧、内部过程稳定性、燃烧室和喷管中的损失有关的问题,以及与系统的基本特性稳定性质、燃烧室内所发生现象的相似性、装药点火和熄火不稳定过程等方面有关的问题。而这一领域中的这些问题的解决就要求有某种程度上了解燃烧室内部过程规律性的知识,其中也包括气动力过程的知识。而借助实验手段来研究这些规律不仅要付出极为昂贵的巨大耗费,而且测量高温气流参数的方法还不够精确,尤其是观测由燃烧室壁及装药所局限的内部气流更难以实现。加之原型系统上的极为珍贵的试验资料不仅要用在检验计算方法本身的正确性,而且还要根据间接指示或者由因素本身得到的计算结果对系统职能作用加以可靠性的检查。

在这种条件下,工程计算方法的创立具有极重要的意义,因为这些计算方法将成为设计的基础。

本书给出了固体燃料火箭系统工作过程一般理论和考虑工质两相性质的燃烧室内气体流动的理论,提出了发动机气体力学各种特别任务的解决方法,叙述了稳态、非稳态过程、推力及能量特性的一般理论及计算方法。

在尽可能较为广泛的问题中,以引入简化假设为代价,使解达到计算关系,甚至可以获得简化的公式。

到目前,固体火箭发动机多数内弹道问题都是在零维情况下,用气体的物理参数按燃烧室自由容积平均的方法求得解决的。但是在这种情况下却失去了气体流动过程和燃烧室压力变化过程之间的相互联系,即破坏了内弹道和气体力学问题的有机统一。同

时, 这种联系在某些情况下(如侵蚀燃烧), 对燃烧室内部过程有很大的影响。

本书证明了固体火箭发动机内弹道基本关系式可由燃烧室内流动的气体力学方程以较为严格的方法得出, 而且可把内弹道的一系列问题看作为气体力学的力界问题。

同时, 在作者所做的工作中也没能弥补燃烧室内部过程现代理论中的不足, 这就是: 把沿燃烧表面燃烧产物的流动看作为具有强迫分布气体流入量的流动。也就是说, 如果不是指以最终近似的经验或半经验的燃速与压力及通道燃气流平均流速的关系式, 则燃烧过程理论与燃烧的实际过程相脱节。

看来, 燃烧室内部过程的完整理论应该在统一方程组基础上用普遍处理方法来描述, 譬如发生在所谓自由容积内的热力-气动过程, 以及发生在凝结相本身和发生在气相中的燃烧过程。这种统一的理论应该是包括在燃烧室内进行的所有物理-化学过程, 并与过程的本性无关。

但是, 因为对燃烧过程本质的研究很不够, 方程的复杂性(这些方程应考虑局部迁移过程), 以及由于分隔凝结相和气相的燃烧表面上的严格边界条件问题, 因而类似的燃烧室内部过程的综合理论目前并不能解决这方面的难题。

在对燃烧室自由容积内平衡的热力学及气体动力学宏观过程的近似计算方法与燃烧过程的描述和建立的可能性进行比较后可知, 目前对前者的可能性研究最为广泛, 因而作者不得不把固体燃料装药燃烧表面看作具有固定移动速度的多孔表面的形式, 并通过多孔表面“吹入”燃料燃烧产物。在一般情况下, 表面的移动速度(燃速)是环绕燃烧表面燃气流气动参数的已知函数。

可以认为, 随着时间的推移, 这种处理方式所存在的明显局限性, 将会以描述燃烧过程本身的关系式方程组取代燃速与燃气流参数的最终关系式的办法来加以消除。

多数气体动力学问题及书中所讨论的内弹道问题, 建议用下述方法来解决: 把固体燃料燃烧产物当作均匀介质, 具有理想气

体的性质，而燃烧产物中存在的凝结粒子用引入假定的理想气体热力学常数的换算值的方式来加以考虑。在类似的处理方法中勿需再考虑气体及粒子动力及热力的不均匀性，因而考虑不均匀性的两相流动可分别地加以研究讨论。

目 录

主要符号	1
------------	---

第一篇 固体火箭发动机工作

过程气体动力学理论基础

第一章	燃烧室内燃烧产物的运动方程	5
第二章	流体动力参数按装药通道横截面的分布	37
第三章	装药通道中气体稳态流动的一元理论	63
第四章	关于装药通道中燃烧产物运动问题的 边界条件	95
第五章	固体火箭发动机内气体动力学的空间流 动问题	120
第六章	燃烧室中两相流动的理论基础	143
第七章	喷管中燃烧产物的流动	199

第二篇 非稳态燃烧室内部过程理论

第八章	以燃烧室自由容积平均数值描述的 内弹道方程	210
第九章	固体火箭发动机的点火与进入稳态工作状态	230
第十章	固体火箭发动机中的推力终止 在燃烧室内固体 燃料装药的强迫熄火	279
第十一章	火箭-发射系统内弹道原理	314

第三篇 燃烧室内稳态过程理论

第十二章	单根内表面燃烧装药发动机一元气体动力和 内弹道计算	331
第十三章	多根管形装药全表面燃烧的发动机气动力和	

	内弹道计算	354
第十四章	旋转固体火箭发动机中的气动力学和 内弹道学	369
第十五章	确定主要内弹道特性散布的理论与 实验方法	393

第四篇 固体火箭发动机推力特性和能量特性

第十六章	发动机装置的推力和比冲	435
第十七章	固体燃料火箭发动机装置中冲量损失	449
参考文献		470

主要符号

- A ——热功当量;
 $A_{\text{кп}}$ ——喷管流动系数;
 a ——音速、系数;
 a_* ——气流临界速度;
 B ——表征燃速与初温关系的热化学系数;
 b ——系数;
 c_p ——等压比热;
 c_v ——等容比热;
 D 、 d ——直径;
 $D(x)$ ——随机数值 x 的分散函数;
 E ——单位质量的内能、弹性模量;
 E_a ——活化能;
 e ——燃烧肉厚;
 F ——横截面面积;
 G ——燃烧产物的秒质量流量;
 $G_{\text{кп}}$ ——通过喷管临界截面的燃烧产物流量;
 g ——组元的质量组分、重力加速度、质量力;
 H ——燃烧产物单位质量的焓;
 h ——通道横截面的浸润周长;
 I ——发动机比冲;
 k ——等熵指数;
 L ——燃烧室特征长度;
 l ——通道长度;
 M ——马赫数、发动机和装药的总质量;
 $M(x)$ ——随机数值 x 的数学期望;
 P ——推力;
 p 及 $\bar{p}$ ——按通道横截面及按自由容积平均的气流任意点上的压力;
 $p_{\text{атм}}$ ——海平面大气压力;
 $p_{\text{ат}}$ ——发动机周围介质的大气压力;

- Q ——秒质量流入量;
 q ——单位热流量、有意义水平;
 R ——充满自由容积产物的气体常数;
 r ——半径、相关系数;
 S ——燃烧表面积;
 $S^2(x)$ ——随机数值的统计分散度;
 T 及 $\bar{T}$ ——按通道横截面及按自由容积平均的气流任意点上燃烧产物的温度;
 t ——时间;
 U ——容积放热强度;
 u ——线性燃烧速度;
 u_1 ——燃烧规律中系数;
 V ——自由容积;
 v_F ——吹入界限速度(紊流燃烧);
 v ——按通道横截面平均的(平均流量的)气流任意点上燃烧产物速度;
 $W_{\text{кр}}$ ——产生点火情况下的单位装药表面积临界热量;
 W ——通过表面积总热流;
 w ——燃烧表面上燃烧产物的正向分速度、喷注速度;
 x ——纵向坐标;
 $1(z_2)$ ——单位函数(克罗涅克拉函数);
 Pr ——普朗特准则数;
 Re ——雷诺数;
 Stk ——斯托克斯数;
 Sh ——舍尔武德(Шервуд)数;
 α ——放热系数;
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ——表征通道横截面中速度分布不均匀度系数;

$$\Gamma \text{ ——等熵指数函数; } \Gamma = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

- δ —— 凝结粒子的尺寸、滞止区内的缝隙值、气流的相对质量速度；
 δ_p —— 气流相对速度界限值；
 ε —— 相对变形；燃烧速度增大系数；
 κ —— 装填参数（波别达诺斯采夫准则数）、温度传导系数；
 ξ —— 流体损失系数；
 η —— 效率、热传导系数；
 θ —— 壁温；
 θ_* —— 点火临界温度；
 λ —— 气流速度系数；
 μ —— 燃烧产物动力粘度、泊松系数；
 ν —— 指数燃烧规律中的幂指数，运动粘度；
 θ —— 质量流入量（质量排出速度）；
 Π —— 等效滞止压力；
 ρ 及 $\bar{\rho}$ —— 按通道横截面及按自由容积平均的气流任意点上的密度；
 $\sigma(x)$ —— 随机数值 x 均方根误差；
 τ —— 摩擦应力；
 φ —— 冲量损失系数；
 $\varphi(r)$ 、 $\psi(r)$ —— 表征通道横截面气流轴向和径向分速度分布的函数；
 φ_1 —— 喷管中速度损失系数；
 φ_2 —— 对喷管前置容积中滞止压力通过喷管的流量系数；
 χ —— 燃烧室中按容积和时间的平均热损失系数。

主 要 标 记

- B —— 点火药特性；
 $B_{\text{ВХ}}$ —— 喷管出口截面上的条件；
 $B_{\text{ВН}}$ —— 装药通道内部中的条件；
 Γ —— 燃烧产物或者气体介质特性；

- л——前底处的自由容积;
- лв——发动机内的条件;
- ж——液体冷却特性;
- з——装药;
- зс——在弹后容积内的条件;
- к——装药通道、凝结相特性;
- кр——喷管临界截面;
- м——发射装药的特性;
- н——在瞬间 $t = 0$ 时的初始条件;
- нар——装药通道外部的条件;
- ном——名义值;
- оп——试验值;
- р——计算条件、侵蚀燃烧条件;
- с——喷管底部的自由容积;
- ср——数值的平均值;
- ст——稳态条件;
- ств——发射管(筒)的特性;
- стат——统计值;
- т——燃料特性;
- ч——凝结相(粒子);
- l——通道出口截面的条件, 其坐标 $x = l$;
- q——考虑热损失时计算数值;
- S——在燃烧表面上的条件;
- s——滞止气流的绝热条件;
- x, y, z ——笛卡儿坐标系统的相应轴上并与燃烧室有联系的投影;
- x, r, φ ——圆柱坐标系统相应轴上的并与燃烧室有联系的投影;
- τ ——考虑摩擦时的计算数值;
- ε ——考虑变形时的计算数值;
- *
- *——临界条件;
- 0——通道入口截面上其坐标 $x = 0$ 时的条件。

第一篇 固体火箭发动机工作 过程气体动力学理论基础

第一章 燃烧室内燃烧产物的运动方程

1.1 概 论

火箭发动机燃烧室气体运动微分方程的十分普遍的表达式,应该考虑在气相中所进行的物理-化学过程(化学反应、扩散),以及气体的粘性性质。这样的微分方程组实质上已不属于气体动力学范畴,而根据 T·卡尔曼采用的术语^[81],则应归属于气动热化学领域。

以上述的观点去描述火箭发动机燃烧室内的气体流动,不仅有可能研究气流本身,而且同时也可能研究气相中的燃烧过程,因而,也就研究了它们相互之间的影响。

在文献[31, 71]中给出了考虑稠密自扩散和热力扩散的均质气体的运动方程式。对于未反应的混合气体,气体运动方程组的综合形式(气动热化学方程),在文献[58, 59]中业已经证明,乃是在质量守恒方程、冲量方程和能量方程中引入考虑扩散和化学反应的附加项得出的。方程组中还必须包括混合气体的每一组分的连续方程。

结果有可能获得概括了纳维-斯托克斯(Навье-Стокс)方程^[68]的综合方程组。尽管这一方程组具有其综合的特点,但利用它对固体火箭发动机燃烧室气流进行研究和数学的描述,却会遇到非常大的困难。

按上述指出的原则所建立的、已反应的混合气体的运动方程,

只是一个均质可压缩流体的运动的综合方程，并且形成不封闭的方程组。为使这一方程组闭合，方程组还必须与下列方程联系起来：确定化学反应速率与组分浓度间的联系；扩散速度和任意浓度间的关系；压力和温度的关系式以及混合气体状态方程。由于燃烧室内物理化学过程研究得还不充分，就是对于那些已广泛使用的燃料之分解产物来说，还没有可能给出这些关系式。因此，在目前所得到的只不过是双组分混合物转移系数的关系^[58,202]。

在燃烧表面上建立这样方程组的边界条件，需要有关于非稳态燃烧期间固体燃料凝结相中进行的物理-化学过程规律性方面的知识。可是就是对于稳态燃烧来说，这些过程研究得也还是不多的。

由于缺乏燃烧室内物理-化学过程方面的有关知识，因而不能同时（在普遍方程的基础上）对固体燃料装药通道内燃烧过程与气体运动过程的进行研究。目前，采用的气动热化学方程，只是在一元稳定问题中给出了实用的结果。实际上，燃烧室内气体的流动问题与燃烧相联系的化学和扩散过程却是三元的，或是对于圆柱形通道及平面通道是二元的，而且在一般情况下都是非稳态过程。

因此，就产生了引入简化假设的必要，以便能利用数学手段来描述燃烧室内的气流。

燃烧过程的示意法就是最重要的简化方法之一。假设火焰结构是以接触中断（Контактногоразрыв）的形式平行于燃烧表面，并通过转变完成化学反应，然后形成均质混合气体。在此假设下，火焰被看作是这样一个区域，在这里向纯净的物质供入一定数量的热量。做这种处理有很大方便，一般说来不会带来很大误差^[177]。

有些作者认为，在火焰区厚度内实际上燃烧过程已完成。在固体燃料燃烧的一般条件下，火焰区厚度仅为一毫米的几分之一。因此，火焰区厚度同药柱通道中燃气流横截面尺寸相比小得可以忽略。

根据上面所指出的情况，可以认为火焰前锋和凝结相表面重叠在一起。

由此可以把燃烧过程看作为通过多孔壁向通道喷注热燃气，而多孔壁以燃料的燃烧速度移动。必须将燃烧速度看作是气流参数的已知函数，此函数以一定的燃烧过程模型为依据，由试验或理论来确定。

所采用模型的主要缺点在于这种独立地确定燃烧速度的方法，但它可以得到充分地补偿，即在流体动力学中可把装药通道内燃料燃烧产物的流动看作是具有分布的气体流入量的流动^[77]。

本章就是阐明在分布流入的通道中对均质气体非稳态准一元运动方程的推导。在推导过程中，作者利用文献〔56〕中叙述的主要思想，得以最简单和有效地估计具有分布气体流入量的通道内流体动力参数分布的不均匀性，并把运动的一般方程归结为更简单的准一元流方程。

1.2 固体燃料装药通道内气体运动流体力学方程, 初始状态

燃烧室内腔乃是一个复杂的通道系统，通道壁由装药的燃烧表面、防护表面和壳体内表面构成。

为了从理论上和实验上研究气体流动的过程，下面讨论三种型式的通道。

第一种型式 在通道（如装药的中心通道、装药外表面和燃烧室壁内表面之间的间隙）内的流体近似于一元流动。

在这些通道中可以分出气体流动的主要方向，它同通道水力轴方向相重合。为描述这种流动，可利用与平均的流动参数相联系的所谓的流体力学方程。这些方程按其结构与按一元流理论所得到的方程相近似，其差别只是有一系列修正系数。利用这些系数可考虑沿通道截面气流参数分布的不均匀性质。

第二种型式 在这种通道里的流动近似于二元的。属于这种型式的，如平面通道-装药开口（即所谓的开缝补偿器）。这些通

道内的主要流动是在开口的平面内实现的。横向流动可以按开口宽度上取流动参数的平均值来考虑。

第三种型式 这种通道明显地表现为三元流。属于这种通道型式的有多喷管束的喷管前容腔，以及燃烧室前顶盖附近的容腔等。

具有第一种型式，亦即近似于一元流动的装药使用得最广泛。相对来说，在这种型式通道内气体的流动比较易于使用数学分析，而描述流动的方程组只和两个变量有关：时间和坐标。其坐标沿通道水力轴来计算，而在某些情况下，在准稳态流动时，只和一个变量——坐标有关。这后一种情况，问题归结为一般微分方程组的积分。通常，这不是很困难的问题。

因此，在第一种型式通道内，气体的流动问题，在一系列情况下可以得出最后的结果——建立流动过程的简单工程计算方法。

根据守恒方程的积分形式，下面给出严密推导的装药通道内气体运动流体力学方程。利用这种方法得到的方程具有综合概括的特性（譬如，普通的一元方程作为特例很容易从流体力学方程中得到）。在推导方程时利用了连续介质的流动理论。

下面，为了便于叙述，忽略了装药通道同火箭一起运动的附加效应。实践证明，在多数情况下作这种忽略是完全允许的。

下面首先讲述推导质量守恒、动量守恒和能量守恒积分方程式的某些特点。一般在推导这些方程时利用下面讲述的两种方法之一^{〔106〕}。

第一种方法在于，所要讨论的某些可变形的不可渗的闭合表面受运动着的气态微团的限制。对于这个占有某些可控容积 V 的微团，可采用主要的能量守恒定律。

第二种方法在于，讨论不动的（非形变的）可渗的闭合表面 S ，受可控制容积 V 的局限。质量流进入所讨论的容积内，并经局限的表面由此容积流出，相应地带进和带出动量和能量。

虽然两种方法最后可能得到同一结果，但第一种方法较为严密，因为利用这种方法时主要的物理守恒定律的形成是针对质量